

刘欣, 刘伟刚, 任杰, 等. 臭氧氧化对再生水厂超滤膜污染的影响分析[J]. 净水技术, 2025, 44(6): 108-115.

LIU X, LIU W G, REN J, et al. Effect of ozonation on UF membrane fouling in reclaimed WWTPs[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(6): 108-115.

臭氧氧化对再生水厂超滤膜污染的影响分析

刘欣, 刘伟刚, 任杰*, 宋承煜, 杨卫华, 汪东迎

(中国石化集团胜利石油管理局有限公司供水分公司, 山东东营 257000)

摘要 【目的】为深入研究臭氧氧化工艺在膜前预处理阶段中的效能及其在减轻膜污染方面所发挥的作用,在供水量为6万 m³/d 的山东某再生水厂通过构建开启/关停臭氧氧化工艺的2种膜前预处理模式开展工程应用研究。【方法】采用三维荧光、分子质量分布等有机物分析以及扫描电镜(SEM)、原子力显微镜(AFM)和傅里叶红外光谱(FTIR)等表征,系统解析臭氧氧化工艺对污染物去除效率和对超滤(UF)膜污染的影响。【结果】在膜前预处理系统中,当开启臭氧氧化工艺后,进厂水中溶解性有机碳(DOC)去除率提高10.82%,臭氧氧化后可进一步提高对芳香类蛋白质和微生物代谢产物的去除,并降低分子质量,总溶解性有机物(DOM)去除率提高至69.43%。UF膜的SEM和AFM表征显示,开启臭氧氧化工艺后,可显著降低膜表面污染程度,减少孔隙堵塞。红外吸收光谱证实,臭氧氧化工艺能进一步降低膜表面C—H、C=O和C—O—C等相关化学键伸缩振动的吸收峰值,减少膜表面附着的含此类化学键的物质,有效缓解膜污染。【结论】臭氧氧化工艺可提高进厂水有机物去除率,降低分子质量,有效缓解膜表面物质附着,是一种有效减轻UF膜污染的膜前预处理工艺。

关键词 再生水 膜污染 臭氧氧化 有机物 荧光特性

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)06-0108-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.06.013

Effect of Ozonation on UF Membrane Fouling in Reclaimed WWTPs

LIU Xin, LIU Weigang, REN Jie*, SONG Chengyu, YANG Weihua, WANG Dongying

(Water Supply Branch of Sinopec Shengli Petroleum Administration Co., Ltd., Dongying 257000, China)

Abstract [Objective] To investigate the efficacy of ozonation process in the pre-membrane pretreatment stage and its role in mitigating membrane fouling, an engineering application study is conducted at a reclaimed wastewater treatment plant in Shandong Province (with a water supply capacity of 60 000 m³/d) by establishing two pre-membrane pretreatment modes with ozone oxidation process activated and deactivated for comparative analysis. [Methods] Through the analysis of organic matter such as three-dimensional fluorescence and molecular weight distribution, as well as characterizations by scanning electron microscopy (SEM), atomic force microscopy (AFM), and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), the impact of the ozonation process on the pollutant removal efficiency and ultrafiltration (UF) membrane fouling was systematically analyzed. [Results] The result showed that after the adoption of the ozone pretreatment process, the removal efficiency of dissolved organic carbon (DOC) in the raw water was increased by 10.82%. After ozonation, the removal of aromatic proteins and microbial metabolites could be further improved, and the molecular weight was reduced. The removal rate of total dissolved organic matter (DOM) was increased to 69.43%. The SEM and AFM characterizations of the UF membrane demonstrated that after the addition of the ozonation process, the degree of membrane surface fouling and pore blockage could be significantly reduced. The infrared absorption spectroscopy confirmed that ozone oxidation process effectively reduces the absorption peaks associated with chemical bonds such as C—H, C=O, and C—O—C on the membrane surface, thereby decreasing the adhesion of substances containing these bonds and alleviating membrane fouling. [Conclusion] The ozonation process can increase the removal rate of organic matters in the influent, reduce the molecular mass,

[收稿日期] 2024-12-31

[基金项目] 胜利石油管理局有限公司供水分公司科学技术进步基金(GKG2303)

[作者简介] 刘欣(1974—),男,高级工程师,研究方向为再生水综合利用与膜处理工艺,E-mail:Liuxin890.slyt@sinopec.com。

[通信作者] 任杰(1979—),男,高级工程师,研究方向为污水处理及高级氧化工艺,E-mail:renjie225.slyt@sinopec.com。

effectively alleviate the attachment of substances on the membrane surface, and it is an effective pre-membrane pretreatment process for reducing the fouling of UF membranes.

Keywords reclaimed water membrane fouling ozonation organic substance fluorescence characteristics

随着全球水资源短缺问题的加剧,再生水的重要性日益凸显,其应用范围已涵盖了工业生产中的冷却水循环、农业灌溉以及城市景观用水等领域。再生水的规模化利用不仅可以减少对传统淡水资源的依赖,也对环境保护起到了积极作用,有效缓解了水资源紧张状况,推动了生态环境的可持续发展进程。

再生水处理过程中,膜分离技术占据主导地位^[1],根据截留分子量差异,可将膜分离技术分为微滤、超滤、纳滤和反渗透。其中,聚偏氟乙烯(PVDF)和聚醚砜(PES)材质的超滤膜因高通量、耐氧化特性,成为市政再生水厂的主流选择^[2-3];而反渗透系统多用来满足深度脱盐需求。研究^[4-5]表明,当以河道水和城市综合水作为再生水水源时,水质受季节、周边污水排放等因素的影响,呈现溶解性有机物(DOM)浓度波动、悬浮物和胶体物质富集、微生物活性变化等特点。处理过程中会产生复杂的协同污染效应,这些污染物在膜表面的吸附和聚集,不仅会造成处理水量和水质的稳定性下降,同时会导致膜污染问题的发生,增加运营成本并缩短膜使用寿命。万颖^[6]、聂煜东等^[7]研究证实了进厂水中的腐殖质,尤其是亲水性组分,易在膜表面吸附、沉积等,造成膜堵塞和严重的膜污染。同时,进厂水中残留的微生物增加超滤膜跨膜压差,引发膜通量衰减。因此,目前膜污染问题成为其被广泛应用的主要瓶颈,限制了再生水项目的工程推广与经济效益,如何规避膜污染是再生水厂需要解决的重要问题^[8-9]。

为解决膜污染的行业痛点问题,膜前预处理成为研究的热点。其中,臭氧作为一种强氧化剂,可去除部分有机物、促进胶体团聚提高过滤效率^[10]。但目前关于臭氧氧化工艺在再生水处理过程中对有机物降解效率及其对膜污染影响的研究相对有限,缺乏实际工程应用中的详细数据支持。因此,本研究旨在通过工程实践,探究臭氧氧化工艺在减少膜污染方面的具体作用,特别是在以河道水和污水处理厂尾水为进厂水的情况下。通过对山东省某再生水厂的实例分析,阐明臭氧氧化工艺对提高膜前

水质的有效性和对减缓膜污染的具体影响,进而为优化膜过滤工艺、降低膜污染风险、提升再生水处理效率提供科学依据及工程案例支撑。

1 项目概况

1.1 设计进出水水质

山东省某再生水厂设计供水规模为6万m³/d,进厂水取自污水处理厂尾水的受纳水体,水中含有部分难降解有机物、氨氮、总磷、氯化物,且硫酸盐含量及硬度偏高等,出厂水主要用于发电厂、钢铁企业循环冷却水补充水,进出水水质分别如表1和表2所示。

表1 进厂水水质情况
Tab. 1 Water Quality of Influent

指标	质量浓度/(mg·L ⁻¹)
氯化物	100~173
硫酸盐	300~441
硬度(以CaCO ₃ 计)	220~514
总溶解固体	650~800
COD	20~35
氨氮	1.0~1.3
氯化物/硫酸盐	350~613

表2 出厂水水质要求
Tab. 2 Requirements for Effluent Quality

指标	质量浓度/(mg·L ⁻¹)
氯化物	≤60
硫酸盐	≤100
硬度(以CaCO ₃ 计)	≤120
总溶解固体	≤500
COD	≤10
氨氮	≤1.0
氯化物/硫酸盐	≤160

1.2 工艺流程

厂区主体工艺采用“生物预处理/混凝沉淀/臭氧接触氧化/炭砂双层滤池/超滤/反渗透”,工艺流程如图1所示。其中,生物预处理采用泥膜共生系统,主要用于去除氨氮及部分有机物,水力停留时间为1.5h;混凝沉淀采用机械混合、四级机械絮凝和

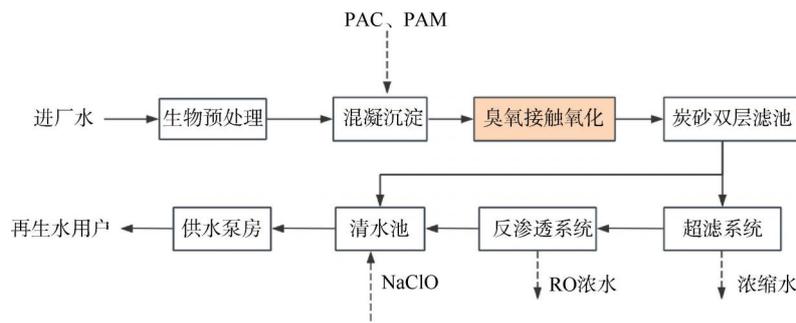


图1 工艺流程

Fig. 1 Process Flow

斜管沉淀系统,主要用于去除来水中的颗粒物、胶体等,聚合氯化铝(PAC)和助凝剂聚丙烯酰胺(PAM)的平均投加量分别为 20 mg/L 和 1 mg/L;臭氧接触池臭氧投加量为 5 mg/L,分 3 段投加,投加比例为 2 : 1 : 1,用于深度去除难降解有机物;炭砂双层滤池,石英砂层高为 0.5 m,活性炭层高为 2.0 m,进一步去除有机物和细小悬浮物,并与臭氧氧化协同保护超滤系统;超滤系统设计平均膜通量为 35 ~ 41 L/(m²·h),工作压力 < 0.25 MPa,产水率 ≥ 92%,用于去除水中的悬浮物和胶体、截留微生物以及部分有机物,保护后续反渗透系统;反渗透系统产水量为 5.0 万 m³/d,设计膜通量为 18.5 L/(m²·h),产水率 ≥ 75%,与滤池出水 1.0 万 m³/d 混掺后供水,超滤和反渗透浓水单独处理后排放。

2 工艺对比与检测

2.1 工程试验设计

为解析臭氧氧化工艺的作用,厂区运行过程中,分别探究了开启/关停臭氧氧化工艺的 2 种膜前处理模式,即“生物预处理/混凝沉淀/臭氧接触氧化/炭砂双层滤池”与“生物预处理/混凝沉淀/炭砂双层滤池”。运行时长分别控制在 60 d,并连续取样分析运行期间水质及膜污染情况。连续取样期间,水温为 18~22 °C。其中,“生物预处理/混凝沉淀/炭砂双层滤池/超滤/反渗透”工艺运行模式为厂区工艺运行初期,运行 60 d 后,开启臭氧氧化工艺。

2.2 检测项目与分析方法

溶解性有机碳(DOC)采用总有机碳(TOC)在线检测仪(岛津,日本)检测,分析前待检测水样通过 0.45 μm 水系滤膜过滤;浊度采用哈希浊度检测仪(TL2300)检测。

三维荧光光谱采用 F7100 三维荧光光谱仪

(450 W 氙灯,日立,日本)进行测定,测定前用超纯水作空白,激发波长(E_x)为 200 ~ 450 nm,增量为 10 nm,发射波长(E_m)为 250 ~ 500 nm,增量为 5 nm;扫描速度为 2 400 nm/min;激发/发射狭缝宽度为 5 nm。分子质量分布采用凝胶渗透色谱(GPC,美国 Agilent 1260 Infinity II),以水溶液作为流动相,在 1 mL/min 的上升流速下,利用不同分子质量分子通过凝胶柱的时间差异进行分离、检测。

超滤膜表面形貌采用扫描电子显微镜(SEM,捷克 TESCAN MIRA LMS),获取的膜样品真空干燥后,表面喷金观察;膜表面三维精细结构,表面形态、粗糙度等采用原子力显微镜(AFM,德国 Bruker Dimension Icon)观察。膜表面污染物官能团和化学键的识别采用傅里叶变换红外光谱(FTIR,美国 Thermo Fisher Scientific Nicolet iS5),根据分子对红外光吸收后得到谱带频率的位置、强度进行定性分析。

3 结果与讨论

3.1 DOC 和浊度变化

不同膜前处理方式对进厂水中有机物 DOC 和浊度的去除效果如图 2 所示。由图 2(a)可知,受来水水质的影响,进厂水 DOC 较为波动。在关停臭氧氧化工艺运行时,进厂水 DOC 质量浓度为 11.15 ~ 14.15 mg/L,运行 20 ~ 60 d,膜前处理工艺出水 DOC 去除效果基本稳定;开启臭氧氧化工艺运行后,进厂水 DOC 质量浓度为 10.28 ~ 14.36 mg/L,均值为 12.38 mg/L,运行 10 d 后,膜前处理工艺出水 DOC 去除效果趋于稳定,表明控制运行时长为 60 d,2 种运行方式均可实现炭砂双层滤池中活性炭的吸附和生物降解平衡,保证工艺稳定性。运行稳定后,关停和开启臭氧氧化工艺时,膜前处理工艺

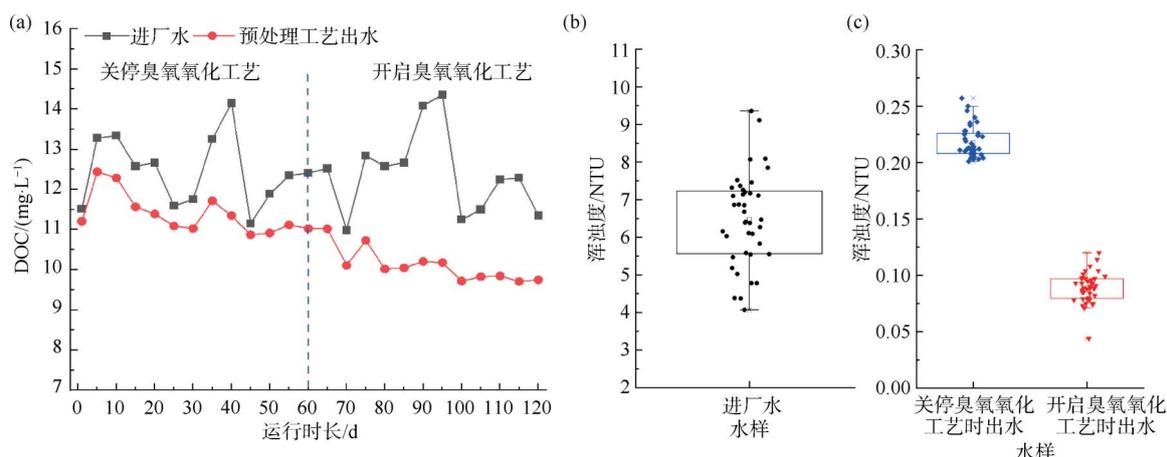


图2 不同膜前处理方式对进厂水中有机物 DOC 和浑浊度的去除效果

Fig. 2 Effect of Different Pre-Treatment before Membrane on DOC and Turbidity Removal in Influent

出水 DOC 均值分别为 11.18 mg/L 和 9.97 mg/L, DOC 去除率提高了 10.82%。由图 2(b)可知,进厂水中浑浊度均值为 6.4 NTU,运行稳定后,关停和开启臭氧氧化工艺时,膜前处理工艺出水浑浊度均值分别为 0.316 NTU 和 0.088 NTU。

这是由于臭氧氧化作用对混凝沉淀出水中复杂的有机物进行开环、断链,分解为小分子有机物或将其完全矿化,杀灭微生物,并降低电位等^[9]。同时,可改变有机物的极性,强化颗粒物凝聚和沉淀,使炭砂滤池过滤过程中有机物和颗粒物更容易被吸附和截留^[10],提高对小分子物质的去除效率,降低出水浑浊度。

3.2 荧光特性变化

进厂水、不同膜前处理方式出水 DOM 荧光特性以及区域体积积分如图 3 所示。根据 E_m/E_s 的不同,可将三维荧光光谱图分为 5 个不同的区域^[11]。I 区与 II 区通常与芳香族蛋白质相关; III 区为类富里酸物质,具有较高相对分子量、富含氧元素且含有芳香环结构的有机化合物; IV 区主要指示溶解性微生物代谢产物; V 区为类腐植酸。

图 3(a)为厂区进厂水中 DOM 荧光特性,由图 3(a)可知,进厂水中的有机物构成以芳香类蛋白质、溶解性微生物代谢产物、类富里酸及类腐植酸为主。图 3(d)为利用荧光区域积分法^[12]对各区域体积积分,由图 3(d)可知,进厂水中 5 种荧光组分的体积占比分别为 3.64%、10.01%、19.51%、23.27% 和 43.57%。

图 3(b)与图 3(c)分别为关停臭氧氧化工艺时

和开启臭氧氧化工艺时膜前处理工艺出水 DOM 荧光特性。由图 3(b)可知,与厂区进厂水相比,在关停臭氧氧化工艺时,膜前处理工艺出水中 5 个分区的荧光强度分别降低 68.86%、63.98%、60.15%、63.25% 和 59.43%,总 DOM 去除率为 61.15%,而相对芳香族蛋白质和溶解性微生物代谢产物,此运行模式下,富里酸类和腐殖质类有机物更难去除。由图 3(c)可知,在开启臭氧氧化工艺时,膜前处理工艺出水中有机物荧光强度进一步减弱,尤其是对芳香类蛋白质以及关停臭氧氧化工艺时较难去除的富里酸和腐植酸类物质的去除格外明显,与关停臭氧氧化工艺时预处理工艺出水相比,去除率分别提高 22.28%、14.73% 和 15.18%,总 DOM 去除率提高至 69.43%。这是由于开启臭氧氧化工艺后,利用臭氧的氧化性氧化分解水中有机物的不饱和键和芳香结构,攻击含氮官能团等,生成极性增强的小分子物质,在后续的过滤过程中更容易被去除,使得总 DOM 去除率提高。

3.3 分子质量分布变化

采用凝胶色谱仪^[13]对进厂水及不同预处理方式下水中分子质量分布测定,响应值可反映样品浓度、判断分子质量分布的宽窄程度和变化趋势,结果如图 4 所示。

由图 4 可知,进厂水分子质量分布分为 2 个区间,第一区间主要为中等分子质量(2 000~5 000 g/mol)的有机物,如腐殖质的部分片段、多糖、多肽等;第二区间为分子质量为 10 000~15 000 g/mol 的中高分子质量有机物,包括部分复杂的腐殖质分子、较大的多

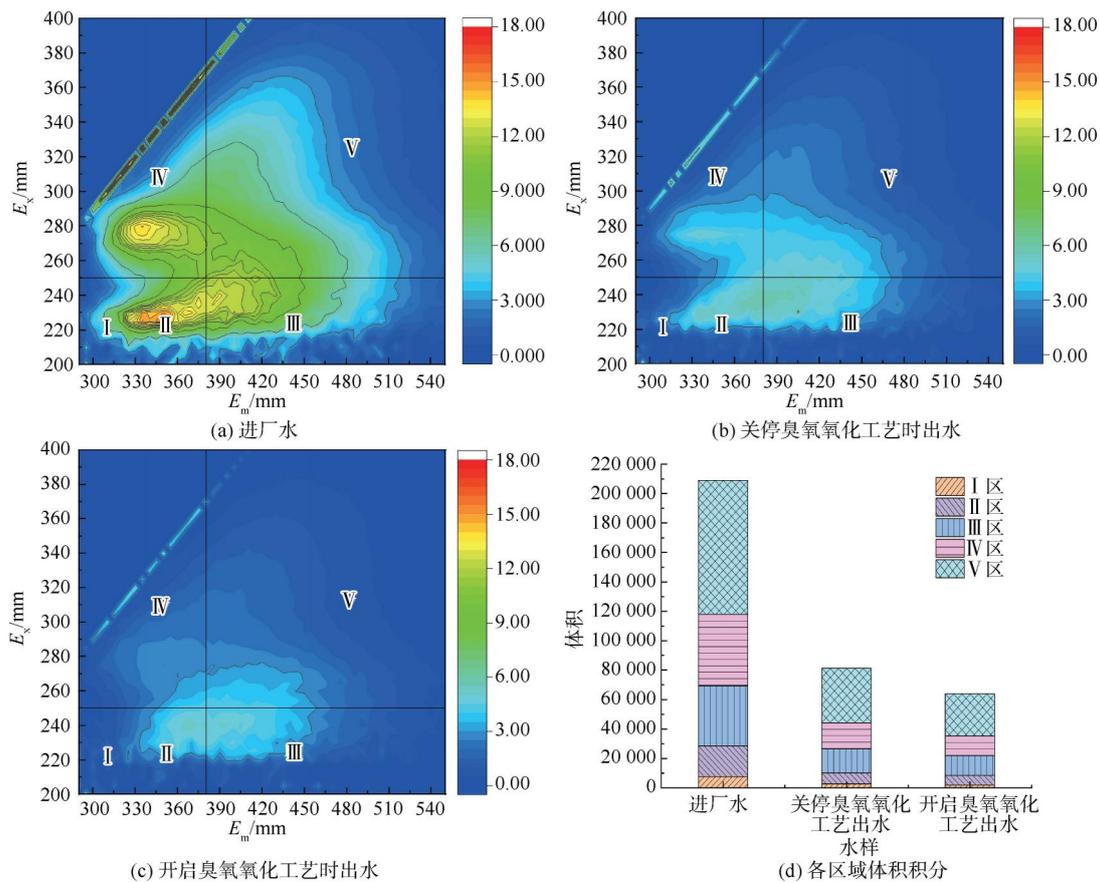


图3 进厂水、不同膜前处理方式出水 DOM 荧光特性以及区域体积积分

Fig. 3 Fluorescence Characteristics and Regional Volume Integration of DOM in Influent and Effluent with Different Pre-Treatment Methods

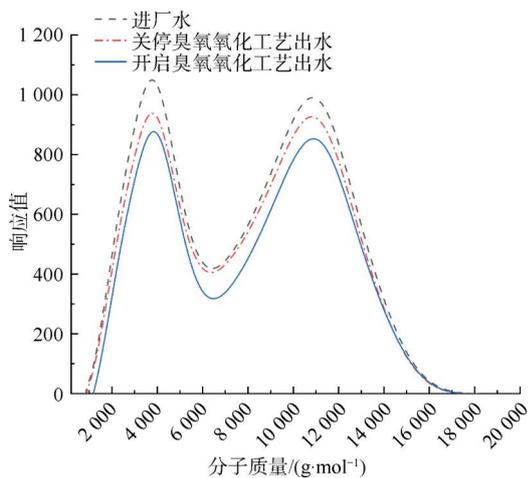


图4 进厂水及不同膜前处理方式下水中分子质量分布

Fig. 4 Molecular Weight Distribution in Influent and Effluent under Different Pre-Treatment Methods

糖类物质和蛋白质片段等,相对第一区间,该区间内分子质量分布较宽,存在多种不同大小的分子。

与厂区进厂水相比,在关停臭氧氧化工艺时,膜

前处理工艺出水中第一区间和第二区间响应峰值分别由 1 049 和 994 降至 937 和 894,同时经计算,第一区间和第二区间 $dw/d \log M$ 值(其中, w 表示某一分子质量区间内有机物的浓度, M 表示分子质量)分别由 2.54 和 4.32 降至 2.46 和 4.23。在开启臭氧氧化工艺时,膜前处理工艺出水中各区间峰宽和响应峰值进一步降低,相较于未开启臭氧时膜前处理工艺的出水,第一区间和第二区间分子质量平均降低 900 g/mol 和 2 000 g/mol,与三维荧光结果中荧光强度变化结果相符。这是由于在臭氧氧化过程中,利用臭氧分子可直接攻击有机物或利用臭氧分解产生的 $\cdot OH$ 氧化分解有机物,通过断键、开环、官能团转化等作用,将大分子有机物转化为分子质量较小的物质,同时臭氧氧化出水可为炭砂滤池提供富氧环境,对臭氧氧化后残留的小分子有机物进一步降解^[9],从而降低水中有机物的总量和各区间的响应峰值,使得分子质量降低更为明显。

3.4 膜污染分析

3.4.1 膜表面形貌

不同预处理方式处理前后超滤膜表面形貌变化如图 5 所示。由图 5(a)可知,初始超滤膜呈现出较为规整的结构,其表面相对平整、光滑,整体分布较为均匀。

由图 5(b)可知,进厂水经关停臭氧氧化工艺的“生物预处理+混凝沉淀过滤”工艺处理后,水中残留的部分颗粒状或无定形无机物(红色实线标记)、薄膜状或形成不均匀覆盖层的有机物(红色虚线标记)以及微生物(黄色虚线标记)等杂质,在膜表面

形成致密的污染层,膜表面较为粗糙、不规则,且有颗粒物沉积。研究^[14]发现,当污染物在膜表面形成不规则的堆积时,会导致膜的整体阻力迅速增大,从而影响膜系统的运行稳定性。由图 5(c)可知,经化学清洗后超滤膜表面的杂质及颗粒大部分被去除,整体形貌与图 5(a)基本相同。再开启臭氧氧化工艺运行相同时间后,由图 5(d)可知,相较于关停臭氧氧化工艺时,膜表面污染程度显著降低,膜表面相较于图 5(b)较为平整,表面污染颗粒相对减少,几乎未见大块无规则堆积,碎片化的膜表面污染在反冲洗过程中更易清除,有利于保证长期稳定地运行。

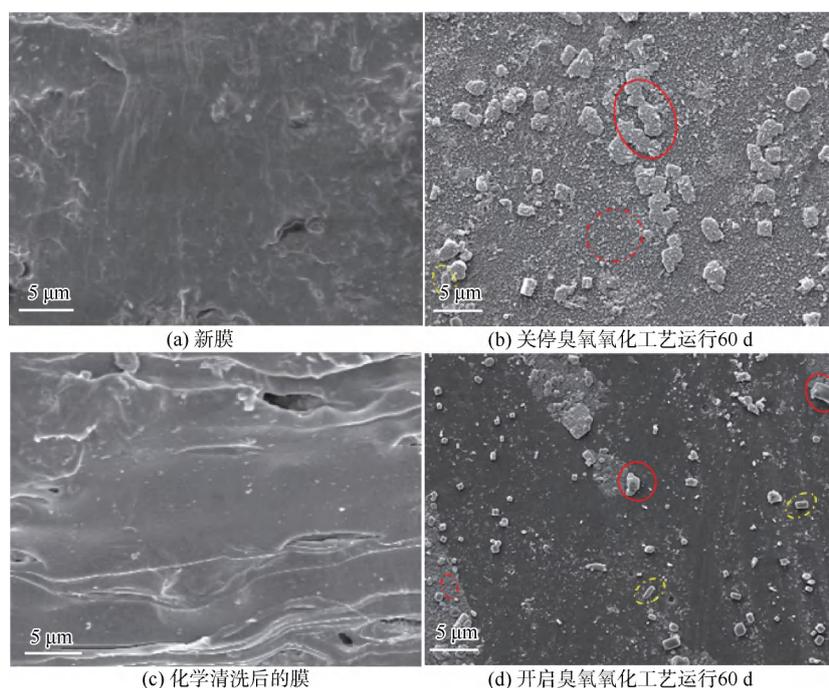


图 5 超滤膜表面形貌变化

Fig. 5 Changes in the Surface Morphology of UF Membrane

3.4.2 AFM 分析

为进一步表征膜表面的三维结构,采用 AFM 进行观测,不同膜表面的三维形貌如图 6 所示。图中最亮的区域代表膜表面的最高点,深颜色区域代表膜的凹面或是膜孔。由图 6(a)可知,新膜表面微观上有较多起伏,平均粗糙度为 43.7 nm,不平整的表面相可提供较大的与颗粒物、有机物等污染物接触表面积^[15]。由图 6(b)可知,超滤膜在过滤经关停臭氧氧化工艺的出水后,膜表面变粗糙,部分区域污染物堆积,最高点凸起 688.4 nm,粗糙度增加至 127 nm,粗糙度增加 65.6%。而粗糙度的增加,会导致有效截留孔径因污染物的堆积而减小,造成截

留率异常升高。由图 6(c)可知,化学清洗后大部分污染层去除,平均粗糙度为 57.3 nm。由图 6(d)可知,在相同条件下,超滤膜在过滤经开启臭氧氧化工艺的出水后,部分区域可分辨出过滤前膜的表面结构,膜表面平均粗糙度为 97 nm。表明开启臭氧氧化工艺后,可进一步深度去除水中残留的、易在膜表面沉积的有机物等,减少孔隙堵塞的可能性,保持膜的透过性能,减轻膜污染程度^[16]。

3.4.3 红外扫描光谱

不同膜前处理方式出水经超滤膜过滤后膜表面红外光谱变化如图 7 所示。由图 7 可知,超滤膜在过滤关停臭氧氧化工艺的出水后,红外光谱在

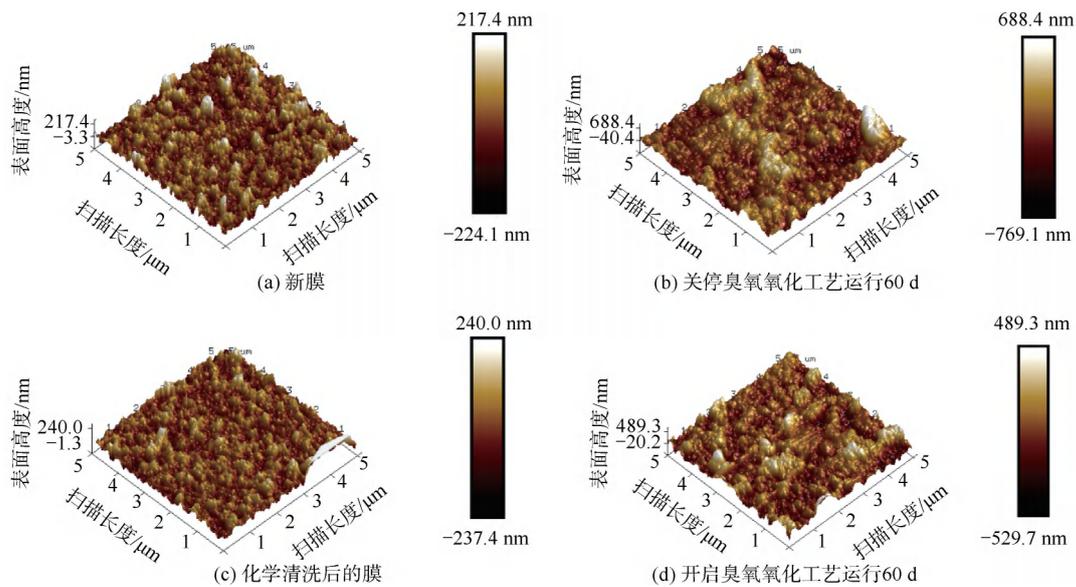


图6 超滤膜表面三维结构变化

Fig. 6 Changes in the Three-Dimensional Structure of UF Membrane Surface

3 370、1 582、1 490、1 240、1 150、1 050、830 cm^{-1} 处出现较强的吸收峰;2 970、1 635 cm^{-1} 和 1 405 cm^{-1} 处显示出弱吸收峰。其中,3 370 cm^{-1} 处较宽的吸收峰主要是 O—H 或 N—H 的伸缩振动;1 582 cm^{-1} 和 1 490 cm^{-1} 处为芳香族 C=C 的伸缩振动区域(1 450~1 600 cm^{-1}),表明膜表面存在芳香环结构的物质残留,可能来自腐植酸或其他芳香族化合物。1 240、1 150 cm^{-1} 和 1 050 cm^{-1} 处为 C—O—C 的伸缩振动,表明膜表面存在天然有机物如腐殖质、富里酸以及多糖类物质^[17],这与三维荧光出水中腐植酸类和富里酸类有机物较难去除的结果相符。830 cm^{-1} 处对应于苯环上 C—H 键的面外弯曲振动吸收峰,这可能是由生物代谢产物、某些有机污染物或混凝剂的沉积引起。

而在同样条件下,超滤膜在过滤开启臭氧氧化工艺的出水后,膜表面有机物出现的吸收峰值显著降低。这一结果说明膜表面腐殖质、蛋白质类和多糖类物质在氧化过程中进一步被降解,也与三维荧光和分子质量分布变化结果相符。同样表明开启臭氧氧化工艺后,可有效缓解膜表面污染。

4 结论

(1)厂区进厂水中 DOC 均值为 12.38 mg/L、浊度均值为 6.4 NTU;经关停臭氧氧化工艺的膜前处理工艺后,出水 DOC 均值降至 11.18 mg/L,浊度降至 0.316 NTU。而开启臭氧氧化工艺后,膜前

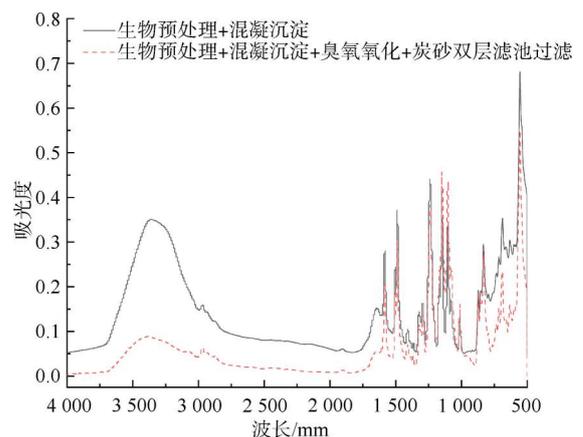


图7 不同膜前处理方式出水经膜过滤后膜表面红外光谱变化

Fig. 7 Changes in Infrared Spectra on the Membrane Surface after Different Pre-Oxidation Treatment

处理工艺出水 DOC 去除率提高了 10.82%,出水浑浊度为 0.088 NTU。

(2)三维荧光结果显示,进厂水中包含芳香类蛋白质、溶解性微生物代谢产物、类富里酸及类腐植酸等有机物,经关停臭氧氧化工艺的膜前处理工艺后,总 DOM 去除率为 61.15%。而开启臭氧氧化工艺后,膜前处理工艺出水中芳香类蛋白质、富里酸和腐植酸类物质被进一步去除,总 DOM 去除率提高至 69.43%,第一区间和第二区间分子质量平均降低 900 g/mol 和 2 000 g/mol。

(3)超滤膜表面形貌和三维结构变化显示,开启臭氧氧化工艺后,可通过与水中的有机物、微生物等发生氧化反应,减轻膜表面污染,降低膜表面粗糙度,保证膜系统的运行。红外光谱变化结果同样表明水中腐殖质、蛋白质类和多糖类物质等被进一步氧化降解,证明了臭氧氧化工艺可降低膜表面污染。

参考文献

- [1] NASCIMENTO T A, FDZ-POLANCO F, PEÑA M. Membrane-based technologies for the up-concentration of municipal wastewater: A review of pretreatment intensification [J]. Separation & Purification Reviews, 2020, 49(1): 1-19.
- [2] ADUSEI-GYAMFI J, OUDDANE B, RIETVELD L, et al. Natural organic matter-cations complexation and its impact on water treatment: A critical review [J]. Water Research, 2019, 160: 130-147. DOI:10.1016/j.watres.2019.05.064.
- [3] BHATNAGAR A, SILLANPÄÄ M. Removal of natural organic matter (NOM) and its constituents from water by adsorption-A review [J]. Chemosphere, 2017, 166: 497 - 510. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.09.098.
- [4] YUAN W, ZYDNEY A L. Humic acid fouling during ultrafiltration [J]. Environmental Science & Technology, 2000, 34(23): 5043-5050.
- [5] LIN C, LIN T, HAO O J. Effects of humic substance characteristics on UF performance [J]. Water Research, 2000, 34(4): 1097-1106.
- [6] 万颖. 紫外高级氧化预处理控制超滤膜污染的效能及机理研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- WAN Y. Effects of the ultraviolet based oxidation pretreatment on ultrafiltration membrane fouling [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [7] 聂煜东, 李金, 张贤明. 水处理过程中膜污染问题及其预处理技术研究进展 [J]. 化工进展, 2021, 40(4): 2278-2289.
- NIE Y D, LI J, ZHANG X M. Research progress on membrane fouling and its pretreatment technology in water treatment [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(4): 2278-2289.
- [8] 李旭芳, 沈鹏飞, 马鲁铭. 水处理中臭氧氧化技术有机物氧化原理解析 [J]. 净水技术, 2023, 42(s1): 18-25.
- LI X F, SHEN P F, MA L M. Organic matter oxidation mechanism in ozonation process of water treatment: A review [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(s1): 18-25.
- [9] 彭锦玉, 李振邦, 张坤乾, 等. 前置臭氧-生物流化床工艺用于水厂提质改造 [J]. 中国给水排水, 2024, 40(12): 94-100.
- PENG J Y, LI Z B, ZHANG K Q, et al. Application of pre-ozone and biological fluidized bed in updating and transformation of waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(12): 94-100.
- [10] 刘文琛, 周伟伟, 成小翔, 等. 臭氧组合技术对给水处理低压膜污染控制研究进展 [J]. 中国给水排水, 2020, 36(8): 44-49.
- LIU W C, ZHOU W W, CHENG X X, et al. Research progress on fouling control of low-pressure membrane pollution in drinking Water Treatment by ozonation combination technology [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(08): 44-49.
- [11] 彭锦玉, 王小侏, 丁纯健, 等. 前置 O₃/H₂O₂ 高级氧化工艺在净水厂提质改造中的应用及效果分析 [J]. 给水排水, 2023, 49(12): 1-7.
- PENG J Y, WANG X M, DING C J, et al. Application and effect analysis of pre-ozonation-based advanced oxidation in improving drinking water quality [J]. China Water & Wastewater, 2023, 49(12): 1-7.
- [12] LI L, WANG Y, ZHANG W, et al. New advances in fluorescence excitation-emission matrix spectroscopy for the characterization of dissolved organic matter in drinking water treatment: A review [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 381: 122676. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122676.
- [13] 高连敬, 杜尔登, 崔旭峰, 等. 三维荧光结合荧光区域积分法评估净水厂有机物去除效果 [J]. 给水排水, 2012, 38(10): 51-56.
- GAO L J, DU E D, CUI X F, et al. Three-dimensional fluorescence combined with fluorescence area integral method for assessing organic removal in water purification plants [J]. Water & Wastewater Engineering, 2012, 38(10): 51-56.
- [14] 夏艳艳, 王琳, 陈天宇, 等. HPSEC-UV-TOC 联用技术操作条件对有机物分子量分布测定的影响 [J]. 净水技术, 2021, 40(5): 51-56.
- XIAO Q Y, WANG L, CHEN T Y, et al. Influence of operation conditions on determination of molecular weight distribution for organic matters by combined technology of HPSEC-UV-TOC [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(5): 51-56.
- [15] 李鑫, 方小峰, 李健生, 等. 纳米 Ag 粒子原位杂化 PVDF 超滤膜的抗污染性能 [J]. 环境科学学报, 2014, 34(3): 638-644.
- LI X, FANG X F, LI J S. Antifouling property of hybrid PVDF ultrafiltration membrane containing in situ formed Ag nanoparticles [J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 34(3): 638-644.
- [16] 邢加建. 紫外/氯预处理控制超滤膜污染的效能与机制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- XING J J. Efficiency and mechanism of UV/chlorine based pretreatments for ultrafiltration membrane fouling control [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [17] ZHOU S, SHAO Y, GAO N, et al. Characterization of algal organic matters of *Microcystis aeruginosa*: Biodegradability, DBP formation and membrane fouling potential [J]. Water Research, 2014, 52: 199-207. DOI:10.1016/j.watres.2014.01.002.